



UAV@LGL – Pilotstudie zum Einsatz von UAV im Rahmen der Landesvermessung in Deutschland

MICHAEL CRAMER, NORBERT HAALA, MATHIAS ROTHERMEL, BENEDIKT LEINSS & DIETER FRITSCH, Stuttgart

Keywords: UAV, Structure-from-Motion, Aerotriangulation, dichte Punktwolken

Zusammenfassung: Die flexible Verwendung von unbemannten Fluggeräten für geodätisch-photogrammetrische Anwendungen wurde bereits verschiedentlich gezeigt, bislang allerdings meist im privatwirtschaftlichen Umfeld. Ein Nachweis der Eignung dieser Technologie für Anwendungen im Rahmen der Landesvermessung stand bislang für Deutschland zumindest noch aus. Im Rahmen einer Pilotstudie des Landesamtes für Geoinformation und Landentwicklung Baden-Württemberg und des Instituts für Photogrammetrie der Universität Stuttgart wurde daher das Potenzial der UAV-basierten photogrammetrischen Datenerfassung unabhängig evaluiert. Zum Einsatz kamen zwei unterschiedliche Kamerasysteme für eine Anwendung im Bereich der Flurneuordnung. Die Georeferenzierung der Bilder erfolgte mittels Structure-from-Motion und photogrammetrischer Bündelausgleichung. Durch Verwendung des Verfahrens der dichten Punktwolkengenerierung wurden anschließend hochauflösende Oberflächenmodelle erzeugt. Die Ergebnisse der Studie konnten alle Anforderungen des Landesamts erfüllen. Damit steht aus Sicht der Landesvermessung ein komplett neues Verfahren für die flexible und auch kostengünstige Datenerfassung zur Verfügung. Neue harmonisierte Grundsätze zur Erteilung von allgemeinen Aufstiegsereulabnissen sollten mittelfristig auch die formal-juristische Seite der Flugbeantragung vereinfachen.

Summary: *UAV@LGL – Pilot Study of the Use of UAV for National Mapping in Germany.* The flexible use of unmanned airborne systems (UAV) in geodetic-photogrammetric applications has already been demonstrated on several occasions, but mostly in the private sector environment. A proof of the suitability of this technology in the context of national mapping was not available so far – at least in Germany. Therefore, a pilot study of the Landesamt für Geoinformation und Landentwicklung Baden-Württemberg – the official mapping agency of Baden-Württemberg – and the Institute of Photogrammetry at University of Stuttgart was initiated to independently estimate the potential of UAV-based photogrammetric data acquisition. Two different camera systems were used for a land management application scenario. The georeferencing of the images was performed using Structure-from-Motion and photogrammetric bundle adjustment. By using the method of dense stereo matching point clouds of highly resolved surface models were created. The results of the study were able to meet all requirements of national mapping. From the national mapping's point of view a completely new method for the flexible and cost effective data capture is available. New harmonized guidelines for the general flight permission should be published in medium term to simplify the formal-legal side of flight applications.

1 Einleitung

Die flexible, aktuelle und hochauflösende Erfassung von Luftbildern kleinräumiger Gebiete ist ein Anwendungsfeld, welches für die Verwendung von unbemannten Fluggeräten zugeschnitten ist. Diese werden mit den Kürzeln UAV für Unmanned Aerial Vehicles oder

RPAS für Remotely Piloted Aircraft Systems bezeichnet. RPAS wurde von der Internationalen Zivilluftfahrt-Organisation ICAO geprägt. Im Zuge der Integration von unbemannten Fluggeräten soll kenntlich gemacht werden, dass es sich bei RPAS um vollwertige Flugzeuge handelt, die von einem Pilot vom Boden aus gesteuert werden (ICAO 2011). Weitere

Details zur Terminologie können BLYENBURGH (2012) entnommen werden. In diesem Beitrag wird durchgängig der Begriff UAV verwendet, auch weil das hier präsentierte Projekt unter dem Titel UAV@LGL durchgeführt wurde. Bemannte Bildflüge mit klassischen Luftbildflugzeugen und großformatigen Kamerasystemen lassen sich aus Kostengründen für kleinräumige Anwendungen kaum einsetzen. Diese Lücke kann durch UAVs sinnvoll geschlossen werden. Auch im Rahmen der Aufgaben der Landesvermessung gibt es Anwendungen, bei denen der Einsatz von UAVs sinnvoll erscheint. Hier sind z. B. Flurneuordnungsverfahren zu nennen, die oftmals kleinräumig stattfinden und einen hohen Bedarf an aktuellen Bilddaten haben. Derartige Verfahren werden in enger Abstimmung mit den betroffenen Eigentümern durchgeführt. Der jeweilige Stand der Arbeiten ist der Teilnehmergemeinschaft kontinuierlich und vor allem anschaulich zu präsentieren. Hier bietet sich natürlich vor allem die photogrammetrische Aufnahme an. Aktuell (Stand März 2013) laufen alleine nur in Baden-Württemberg über 450 Flurneuordnungsverfahren. Diese Verfahren umfassen in etwa 10% der Landesfläche. Das belegt deutlich, dass bei Eignung der UAV-Technologie zur zeitnahen und mehrfachen Datenerfassung ein potenzieller Markt existiert.

Das Landesamt für Geoinformation und Landentwicklung Baden-Württemberg (LGL BW) hat in Kooperation mit dem Institut für Photogrammetrie (ifp) der Universität Stuttgart das Pilotprojekt UAV@LGL durchgeführt, in dem stellvertretend für alle Landesvermessungsbehörden in Deutschland das Potenzial der UAV-gestützten Datenerfassung im Rahmen eines Flurneuordnungsverfahrens untersucht werden sollte. Dazu liegen zwei UAV-Flüge mit unterschiedlichen Kameras vor, und zwar mit der Canon IXUS 100 und der Ricoh GXR Mount A12 kombiniert mit Zeiss Objektiv. Der Fokus der Auswertungen liegt dabei auf der Analyse des Genauigkeitspotenzials der 3D-Punktbestimmung im Rahmen der Aerotriangulation (AT). Die orientierten Bilder werden anschließend benutzt, um dichte digitale Oberflächenmodelle (DOM) zu generieren. Hierzu wird ein modifizierter Semi-Global Matching Ansatz einge-

setzt, um Stereo-Korrespondenzen zu bestimmen. Die rekonstruierten Oberflächenmodelle werden hinsichtlich Genauigkeit und Vollständigkeit evaluiert.

Die Anforderungen des LGL und die in der Studie abzuleitenden Geodaten (Produkte) sind wie folgt:

- orientierte Luftbilder, Bodenauflösung mindestens 10 cm,
- digitale Orthophotos, Bodenauflösung mindestens 10 cm, Lagegenauigkeit < 1 Pixel,
- 3D-Modelle, Gitterweite 1 m, Strukturelemente (Bruchkanten), Höhen- und Lagegenauigkeit < 10 cm,
- Luftbildschrägaufnahmen aus vordefinierten Positionen und Aufnahmerichtungen,
- 3D-Modellierung markanter topographischer oder touristischer Objekte (Landmarken).

Neben Anwendungen im Rahmen der Flurneuordnung können UAVs prinzipiell für all diejenigen Aufgaben der (Landes-)Vermessung eingesetzt werden, die sich auf lokal beschränkte Bereiche beziehen. Das LGL BW denkt z. B. an die 3D-Erfassung von Kreuzungen und Kreisverkehren. Studien zum Einsatz von UAVs in der Katastervermessung wurden in der Schweiz (MANYOKY et al. 2012) und in den Niederlanden durchgeführt (VAN HINGSBERG et al. 2013). Das IGN Frankreich testet in Kooperation mit einem französischen Energieversorger die UAV-gestützte 3D-Vermessung von Flussdeichen an der Rhône (CRAMER et al. 2013b). Die britische Landesvermessung erwägt die Verwendung von UAVs unter anderem zur Aktualisierung von Geländemodellen in lokal eingeschränkten und schwer zugänglichen Bereichen, z. B. Erosion von Steilküsten (CRAMER et al. 2013b).

Bei dem hier vorliegenden Beitrag handelt es sich um eine gekürzte und in Teilen ergänzte Version des Beitrags, der für die Dreiländertagung / 33. Wissenschaftliche-Technische Jahrestagung der DGPF in Freiburg eingereicht wurde (CRAMER et al. 2013a).

2 UAV-Plattformen

Die Entscheidung für eine Trägerplattform hängt wesentlich von der geplanten Anwendung ab. Entscheidend sind dabei vor allem

die Größe des Gebiets, die Anforderungen an die Nutzlast und die zu realisierende Aufnahmegeometrie. Je nach Antriebskonzept muss zwischen Starr- und Rotorflüglern unterschieden werden, wobei beim Einsatz von Starrflüglern von einer größeren Flächenleistung ausgegangen werden kann. Im Unterschied dazu erlaubt es ein Rotorflügler sehr flexible Aufnahmerichtungen zu realisieren, was für spezielle Anwendungen wie die 3D-Rekonstruktion von einzelnen Objekten, z. B. Gebäuden, vorteilhaft sein kann. Die erforderliche Nutzlast wird durch das Gewicht der Kamera und gegebenenfalls weiterer Zusatzsensoren festgelegt. Dieses legt die dann notwendige UAV-Gewichtsklasse fest. Die allgemein akzeptierten Einteilungen in UAV-Gewichts- bzw. Systemklassen können BLYENBURGH (2012) entnommen werden. Die UAVs der Mini- (maximales Startgewicht (maximum take off weight, MTOW) < 30 kg, Reichweite < 10 km) bzw. Micro-Kategorie (MTOW < 5 kg, Reichweite < 10 km) sind zahlenmäßig am stärksten verbreitet, was den überwiegenden Einsatz von kleineren Systemen für demnach kleinere Projektgebiete als ein Hauptanwendungsfeld für UAVs nachweist. Die im Pilotprojekt eingesetzten UAVs sind ebenfalls der Kategorie Micro zuzuordnen.

Die beiden eingesetzten Starrflügler wurden vom Institut für Flugmechanik und Flugregelung (iFR) der Fakultät Luft- und Raumfahrttechnik & Geodäsie der Universität Stuttgart zur Verfügung gestellt. Durch die Kooperationen mit dem ifp fanden seit Sommer 2011 erste photogrammetrische Bildflüge statt. Die Erstflüge wurden mit dem Multiplex Twinstar II Träger durchgeführt, einem Starrflügler mit zwei Elektromotoren, einer Spannweite von 1,4 m und einem Abfluggewicht von ca. 1,3 kg. Die Nutzlastkapazität von ca. 300 g erlaubt es, eine kleine Digitalkamera mitzuführen. Die maximale Flugzeit liegt bei ca. 20 min.

Für die Erstbefliegung im Rahmen des UAV@LGL Projekts wurde die Twinstar II zusammen mit der Canon IXUS 100 IS im März 2012 (Frühjahrsbefliegung, vor Belaubung) über dem Projektgebiet geflogen. Die Kamera Ricoh GXR Mount A12 hat inklusive des Objektivs ein Gesamtgewicht von ca. 650 g, das für die Twinstar II zu groß ist. Da-

her wurde die Zweitbefliegung mit dem Flugzeug Maja der Firma Bormatec durchgeführt. Diese Plattform ist ebenfalls kommerziell verfügbar und besitzt eine höhere Nutzlastkapazität, denn sie wurde für die Aufnahme von Equipment, z. B. für Luftbilddaufnahmetechnik, ausgelegt (BORMATEC 2013). Der Rumpf kann dazu in fast kompletter Länge aufgeklappt werden. Das einmotorige Flugzeug besitzt eine Luftschraube am Heck hinter dem Leitwerk, besteht aus expandiertem Polypropylen (EPP) und kann wie die Twinstar II auf dem Rumpf gelandet werden. Das Flugzeug ist wie die Twinstar II mit dem iFR onboard Computersystem ausgestattet. Die sonstigen technischen Daten lauten wie folgt: Spannweite 220 cm, Länge 120 cm, Abfluggewicht 3,5 kg, inklusive Kamera 650 g, Akku 545 g und Elektronik 300 g. Die Flugzeit liegt bei ca. 30 min. Der Zweitflug fand im August 2012 bei voller Belaubung statt.

Die Abb. 1 zeigt beide Trägersysteme und die jeweilige Kamerainstallation. Während in der Twinstar II die Kamera mit faserverstärktem Klebeband in einer Rumpfaussparung befestigt wurde, ist in der Maja eine Pertinaxplatte im Flugzeugrumpf montiert, an der die Kamera mittels Objektivgewinde fixiert werden kann. Zusätzlich befindet sich vor dem Objektiv eine mittels Servo verschiebbare Klappe, die zur Landung vor die Optik geschoben wird, um diese vor Verschmutzungen und Beschädigungen zu schützen.

3 Kamerasysteme

Die Aufnahme der Bilder erfolgte mit zwei verschiedenen Kamerasystemen. Für die Erstbefliegungen mit der Twinstar II wurde eine Canon IXUS 100 IS Kompaktdigitalkamera mit 12 MPix (3000 x 4000 pix) eingesetzt. Die Kamera hat eine nominelle Brennweite von 5,9 mm. In Kombination mit einer 1/2.3" CCD – korrespondierende CCD-Fläche 4,62 x 6,16 mm², Bilddiagonale 7,7 mm – realisiert die Kamera einen maximalen Bildwinkel von ca. 66°, im regulären Kleinbildformat entsprechend einer Weitwinkelbrennweite von ca. 35 mm. Die einzelnen Pixel auf der CCD haben nur eine Größe von 1,54 x 1,54 µm², was sich negativ auf die Empfindlichkeit bzw. das

Rauschverhalten der Kamera auswirken kann. Wie viele andere Modelle der Consumer-Klasse verfügt auch diese Kamera über einen optischen Bildstabilisator, der vor allem dazu dienen soll, bei schlechten Lichtverhältnissen ohne Einsatz eines Stativs verwacklungsfreie Aufnahmen mit längeren Verschlusszeiten zu ermöglichen. Zu dem Zeitpunkt, als die Kamera als optischer Sensor für diese Plattform ausgewählt wurde, standen photogrammetrische Belange nicht im Mittelpunkt. Die Kamera wurde in erster Linie wegen ihres geringen Gewicht von 140 g ohne Akku und der für Canon-Kameras typischen Schnittstelle, dem so genannten Canon Hack Development Kit (CHDK), ausgewählt. Über diese Schnittstelle wird direkt in die Funktionalität der Kamera eingegriffen, so dass der Flugzeugrechner die Kamera auslösen kann.

Im Vergleich zum Standardmodell wurde die Kamera an zwei Stellen modifiziert, um Bildunschärfen bei der Canon-Kamera wäh-

rend der Aufnahmen aus bewegten Trägern möglichst zu vermeiden. Dazu wurde zum einen das innerhalb der Optik befindliche Neutralsichtfilter (ND-, oder Graufilter) mittels der CHDK-Firmware deaktiviert, welches die Original-Kamerafirmware bei hellem Umgebungslicht standardmäßig aktiviert. Als zweite Maßnahme wurde die Bildstabilisierung mechanisch durch Verklebung der beweglichen Linse an geeigneter Stelle im Innern des Objektivs deaktiviert. Diese beiden Modifikationen führten bei der Zweitbefliegung zu deutlich besseren Ergebnissen als bei den Erstbefliegungen im Jahr 2011 (CRAMER & HAALA 2012).

Alternativ zur Canon wurde eine zweite Kamera beschafft, die speziell unter Berücksichtigung der Anforderungen für einen photogrammetrischen Bildflug ausgewählt wurde. Auswahlkriterien waren unter anderem eine hohe Auflösung des Bildsensors bei möglichst großem Bildformat, geringes Gesamtgewicht,

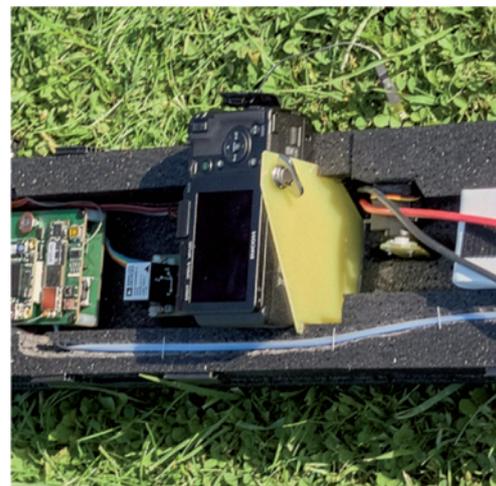


Abb. 1: UAV-Trägersysteme: Twinstar II mit Canon IXUS 100 (links) und Maja mit Ricoh GXR Mount A12 (rechts).

geringes Gesamtvolumen bei dennoch stabilem Gehäuse, keine beweglichen Teile in der Optik, z. B. für Bildstabilisierung oder Sensorreinigungssystem, gute Festbrennweiten-Optik bevorzugt mit manueller direkter mechanischer Fokussierung und eine kabelgebundene Auslösung des Verschlusses. Ausgewählt wurde letztlich die Kamera Ricoh GXR Mount A12. Die GXR-Modellreihe ist ein modular aufgebautes Kamerasystem, das vom Konzept her einer klassischen Messkamera mit möglichst fest vorgegebener Kamerageometrie entspricht. Das gewählte Modul Mount A12 verfügt als einziges über einen Anschluss für Wechselobjektive (Leica-M-Bajonett) und erlaubt so die Kombination mit hochwertigen Objektiven von Leica bzw. kompatiblen Objektiven, z. B. von Zeiss oder Voigtländer. Im Rahmen dieses Projekts wurde ein Zeiss Bion T* 21mm f/2.8 beschafft. Das nun zur Verfügung stehende Kamerasystem hat folgende wesentliche Kenngrößen: Bildsensor CMOS, 4288 x 2848 pix, Pixelgröße 5,5 x 5,5 μm^2 , 23,6 x 15,7 mm^2 (APS-C), Bilddiagonale 2,83 cm, maximaler Bildwinkel ca. 68°. Damit ist die Bildgeometrie nahezu identisch mit der der Canon IXUS 100, so dass für beide Kameras identische Bildflüge, d. h. identische Blockgeometrie, geplant werden konnten. Die jedoch im Vergleich zur Canon deutlich größere Pixelgröße und die höhere Qualität der Optik ließen in Bezug auf Bild- und Punktmeßqualität bei nachfolgenden Auswertungen bessere Ergebnisse erwarten.

Um die möglichst aktuelle innere Geometrie der Kamera zu erfassen – eine der wesentlichen Vorgeben in der photogrammetrischen Bildauswertung – wurde direkt vor jedem Bildflug eine Vor-Ort-Kalibrierung mit einem mobilen 2D-Testfeld vorgenommen (CRAMER et al. 2013a). Bei den weiteren Auswertungen wurde dann immer diejenige Kalibrierung verwendet, die zeitlich am nächsten zu den Bildflügen lag. Der Vergleich der Ergebnisse der Kalibrierungen der beiden Kameras zeigt, dass die Ricoh/Zeiss-Kamera eine höhere Objektraumgenauigkeit liefert. Die Genauigkeit der Bildpunktmessung liegt für die Canon im Bereich von 1/10 pix. Für die Ricoh/Zeiss-Kamera konnten Werte unter 5% der Pixelgröße erzielt werden (CRAMER et al. 2013a).

4 UAV-Datenerfassung und Genauigkeitsuntersuchungen

4.1 Bildflüge Hessigheimer Felsengärten

Die empirischen Testflüge wurden im Gebiet der Hessigheimer Felsengärten durchgeführt, das Gebiet in dem das LGL auch seine Maßnahmen zur Flurneuordnung vorgenommen hat. Das Gebiet liegt unmittelbar am Neckar und zeichnet sich durch steile Weinberglagen aus. Für die UAV-Befliegungen wurde ein ca. 1000 m x 400 m großes Gebiet definiert, welches in einem klassischen photogrammetrischen Bildverband erfasst werden sollte. Dazu wurden insgesamt 5 Längsstreifen und zwei Querstreifen mit hohen Überdeckungsverhältnissen von ca. 80% innerhalb des Streifens und ca. 70% zwischen benachbarten Streifen geplant. Diese hohe Überdeckung diente einerseits dazu, die für einen UAV-Flug deutlich größeren Abweichungen vom Normalfall aufzufangen. Vor allem bei geringeren Querüberdeckungen kann es sonst zu ungenügender Verknüpfung zwischen Nachbarstreifen kommen. Die hohe Überlappung ist aber auch für die spätere Generierung dichter Oberflächenmodelle hilfreich. Die Abb. 2 (links) zeigt die Flugplanung mittels IGIPlan. Anhand dieser GoogleEarth-Visualisierung kann auch die anspruchsvolle Geländetopographie vermittelt werden. Die Flüge wurden derart geplant, dass eine nominelle Bodenpixelgröße (GSD) von 4,5 cm – 7,3 cm realisiert wird. Die starke Variation der GSD liegt an Geländehöhenunterschieden von ca. 100 m. Ebenfalls sind die Überdeckung der Flugstreifen im Gelände und die Lage der signalisierten Pass- und Kontrollpunkte in der Abbildung angedeutet. Insgesamt konnte im Rahmen der weiteren Auswertungen auf 33 im Projektgebiet durch Farbmarkierungen signalisierte Punkte zugegriffen werden, die im Vorfeld der Flugkampagnen vom LGL vermarktet und mit GPS eingemessen worden waren. Die Standardabweichung dieser Objektpunkte liegt bei etwa 1 cm.

Der rechte Teil der Abb. 2 zeigt die Flugtrajektorie für den Ricoh/Zeiss-Test. Nach Übergabe der Kontrolle vom Pilot an den Autopilot fliegt das UAV die geplanten Fluglinien ge-

mäß den vorgegebenen Wegpunkten aus der Flugplanung automatisch ab, wobei der Pilot am Boden jederzeit den Autopilot deaktivieren kann. Für den Autopilot werden als Wegpunkte nur die Anfangs- bzw. Endpunkte der photogrammetrischen Streifen in entsprechender Reihenfolge übernommen. Die einzelnen Projektionszentren sind hier nicht von Bedeutung, da die Kamera während des Bildflugs in festen Zeitabständen ausgelöst wird

(Auslöseintervall 1,5 s). Unter Berücksichtigung der üblichen Fluggeschwindigkeit von ca. 20 m/s führt das dann zu der gewünschten Überdeckung in Flugrichtung. Das Auslöseintervall wird in der aktuellen Konfiguration nicht an die momentane Geschwindigkeit angepasst, so dass die Basislängen leicht variieren.

Die Abb. 3 zeigt die Bildverbände Canon (207 Bilder) bzw. Ricoh/Zeiss-Befliegung

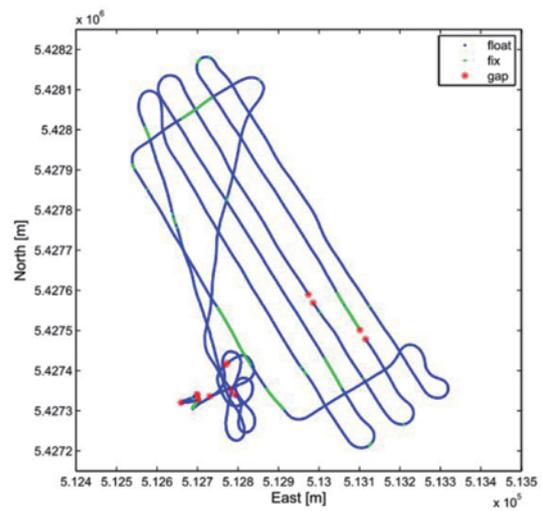
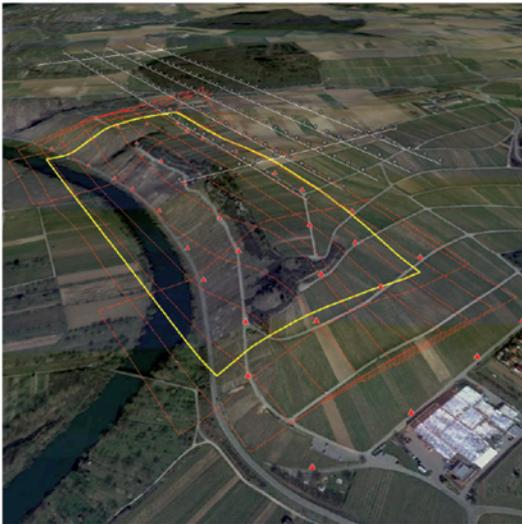


Abb. 2: Projektgebiet Hessigheim mit überlagerter Flugplanung und Streifenabdeckung (links) und die bei der Ricoh/Zeiss-Befliegung realisierte Flugtrajektorie aus der differentiellen GPS-Phasen-Auswertung (rechts).

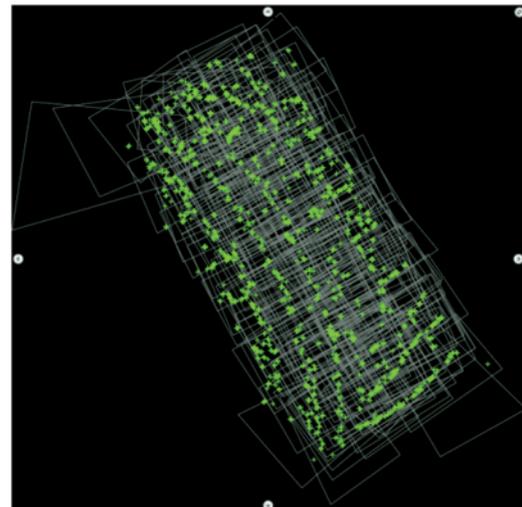
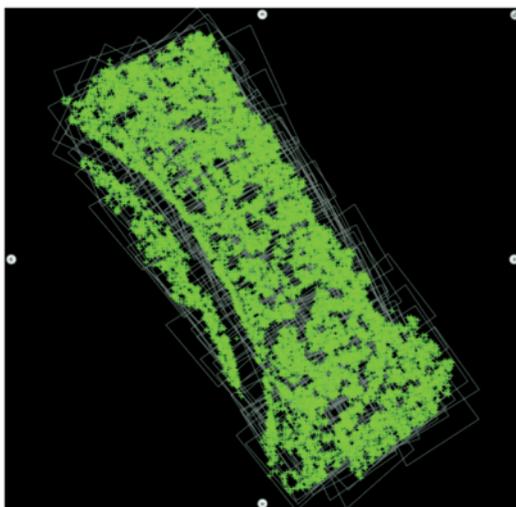


Abb. 3: Bildflüge Hessigheim: Blockgeometrie Canon Flug vom 23.3.2012 (links) und Ricoh/Zeiss Befliegung vom 23.8.2012 (rechts) mit automatischen Verknüpfungspunktmessungen aus Match-AT Auswertung.

(190 Bilder). Die Bildüberdeckungen entsprechen weitestgehend den Vorgaben, wobei aufgrund des festen Auslöseintervalls und der nicht stabilisierten Kameraaufhängung Abweichungen von den nominellen Überdeckungsverhältnissen auftreten können. Die maximalen Abweichungen aus der Horizontalen variieren beim Canon Flug zwischen -18° und 12° für den Rollwinkel (ω), und zwischen -16° und 15° für den Nickwinkel (ϕ). Für die Ricoh/Zeiss Befliegung liegen die Variationen zwischen -15° und 12° für Roll- und zwischen -18° und 30° für den Nickwinkel. Bei Standardbildflügen mit bemannten Flugzeugen liegen diese Abweichungen i.d.R. unter $\pm 5^\circ$. Diese starken Abweichungen vom Nadirfall ziehen gewisse Modifikationen für den späteren photogrammetrischen Auswerteprozess nach sich. Dies wird im nachfolgenden Abschnitt erläutert.

4.2 Prozessierungskette

Die photogrammetrische Auswertung der UAV-Bildverbände zerfällt in mehrere Arbeitsschritte (Abb. 4). Zunächst werden die im Vorfeld bestimmten Kalibrierparameter der Kamera in den Bildern angebracht, und zwar die Korrektur der Bildhauptpunktlage und die Korrektur der Objektivverzeichnung, sodass „quasi verzeichnungsfreie“ Bilder ausgewertet werden. Über ein Structure-from-

Motion (SfM) Verfahren werden die Bilder miteinander verknüpft und die Orientierung der Bilder bestimmt. Die Verknüpfung wird über SIFT-Punkte realisiert. Der SfM-Ansatz kommt ursprünglich aus der Computervision und erlaubt die Auswertung von im Prinzip beliebig angeordneten Bildverbänden. Ein Beispiel für einen derartigen SfM-Ansatz ist das Softwaresystem Bundler, das innerhalb des Photo Tourism Projektes entwickelt wurde (SNAVELY et al. 2008). Die Auswertung der in diesem Artikel beschriebenen UAV-Bildatensätze wurde durch die in ABDEL-WAHAB et al. (2011 & 2012) beschriebene SfM-Implementierung realisiert, die auf einer Modifikation des Ansatzes von FARENZENA et al. (2009) basiert. Als Ergebnis des SfM-Verfahrens liegen die ausgeglichenen 3D-Koordinaten aller Verknüpfungspunkte und die äußere Orientierung aller Bilder in einem lokalen Koordinatensystem vor. Der Datumsübergang vom lokalen Koordinatensystem in das gewünschte Geländekoordinatensystem (hier UTM-Koordinaten) wird über die Projektionszentren aus der GPS-Bahnberechnung realisiert.

Die SfM-Auswertung ist eine Vorverarbeitung, um für jedes Bild die Elemente der äußeren Orientierung zur Verfügung zu stellen, die dann ins UTM-Koordinatensystem transformiert werden. Damit ist eine hinreichend gute Vororientierung gewährleistet, so dass auch in einer klassisch photogrammetrischen Auswertesoftware (hier Match-AT) eine automati-

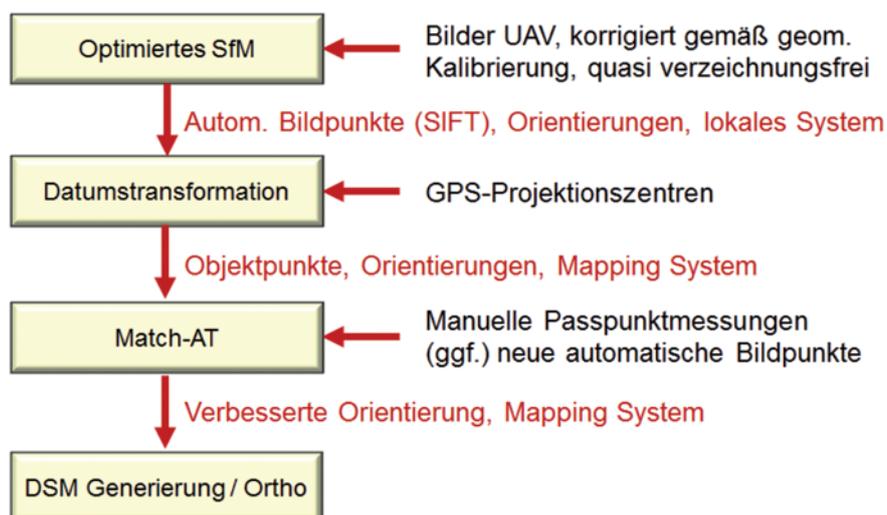


Abb. 4: Am ifp realisierte Prozesskette zur UAV-Bilddatenauswertung.

sche Verknüpfungspunktmessung erfolgreich durchgeführt werden kann. Standardmäßig gehen Programme wie Match-AT von Senkrechtaufnahmen aus. Aufgrund der hohen Dynamik der UAV-Plattform muss von starken Abweichungen vom Normalfall ausgegangen werden (siehe oben), so dass die üblicherweise implementierten Verfahren der Näherungswertbeschaffung unter Umständen nicht zur Lösung führen. In der neuen Programmversion von Match-AT ist die Näherungswertbeschaffung für die Orientierungselemente für UAV-Bildverbände erweitert worden, so dass sich unter Umständen die Notwendigkeit der SfM-Vorprozessierung der Bilder künftig erübrigt. In Match-AT erfolgen dann die manuelle Messung der Pass- und Verknüpfungspunkte und die weitere Auswertung nach dem Standardverfahren.

Eine ausschließliche Auswertung der Bilder basierend auf dem SfM-Verfahren ist möglich, sofern ein Übergang in das Koordinatensystem der Landesvermessung erfolgen kann. Diese Funktionalität bietet beispielsweise die Software Pix4D Software. Sie basiert auf SfM-Verfahren und realisiert die quasi vollständige automatische Auswertung von Bildern von der Georeferenzierung bis zu dichten Oberflächenmodellen (KÜNG et al. 2011). Der Datumsübergang wird durch manuelle Passpunktmessung realisiert oder erfolgt über die direkt gemessenen GPS-Projektionszentrumskordinaten. Eine nachfolgende Aero-triangulation, wie sie hier mit Match-AT vorgenommen wurde, ist nicht mehr notwendig. Eine parallele Auswertung des Datenmaterials mit einer derartigen Software wurde nicht durchgeführt.

4.3 Automatische Aero-triangulation

Die Aero-triangulation der beiden Bildverbände wurde mit der Software Match-AT von Trimble/inpho durchgeführt. Das Match-AT-Projekt wurde mit den Resultaten aus der SfM-Auswertung aufgesetzt. Anschließend erfolgt die manuelle Messung aller signalisierten Punkte. Durch die hohe Überlappung zwischen den Bildern können bis zu 30-fach verknüpfte Punkte bestimmt werden. Anschließend müssen die automatischen Verknüp-

fungen hergestellt werden. Dazu wurden zunächst die bereits durch SfM über SIFT durchgeführten Punktzustellungen nach Match-AT importiert und eine passpunktbasierte Auswertung durchgeführt (SfM-Pkte). Die Ergebnisse befinden sich in Tab. 1. Die Tabelle zeigt neben der Anzahl der verwendeten Pass- und Kontrollpunkte (PP/KP) und dem geschätzten Wert von σ_0 die mittlere geschätzte Genauigkeit (Standardabweichung, innere Genauigkeit) der Geländepunkte und die RMS-Werte aus den Differenzen an den Kontrollpunkten (äußere Genauigkeit). Das σ_0 der AT mit Verwendung der SfM-Verknüpfung liegt für beide Bildflüge im Bereich von knapp besser 1 pix, was sehr gut mit der zu erwartenden Genauigkeit der SIFT-Punktzustellung korrespondiert. Bei SIFT handelt es sich um eine merkmalsbasierte Punktzustellung. Wird die Punktübertragung mit Match-AT vorgenommen, d. h. eine Kombination von merkmalsbasierter und zusätzlicher grauwertbasierter Zuordnung (AAT-Pkte), werden zwar wesentlich weniger Verknüpfungspunkte gefunden. Die Qualität dieser Zuordnung ist aber deutlich besser und liegt im Bereich von 1/3 pix. Prinzipiell wäre es natürlich auch möglich, die gefundenen SIFT-Punkte aus dem SfM durch eine nachgeschaltete grauwertbasierte Zuordnung zu verbessern (REMONDINO 2006). Dieses wurde hier aber nicht vorgenommen. Die oben genannten Werte für σ_0 ergaben sich sowohl für den Canon- als auch für den Ricoh/Zeiss-Flug. Die höhere Qualität der Punktzustellung wirkt sich auch positiv auf die innere und äußere Genauigkeit der Objektpunktbestimmung aus. Im Vergleich zur nominellen Bodenpixelgröße von 4,5 cm – 7,3 cm liegen die absoluten Genauigkeiten im deutlichen Sub-Pixel Bereich, wobei sich kaum Unterschiede in den Objektpunktgenauigkeiten aus Canon- bzw. Ricoh/Zeiss-Auswertung erkennen lassen. Dies ist insofern erstaunlich, als dass im Rahmen der Auflösungsuntersuchungen der beiden Kameras (CRAMER et al. 2013a) Qualitätsunterschiede beim Auflösungspotenzial des Ricoh/Zeiss-Systems im Vergleich zur Canon-Kamera nachgewiesen wurden. Bei den Vergleichen zwischen beiden Systemen muss aber berücksichtigt werden, dass die realisierte Match-AT-Verknüpfung für den Canon-Bildflug im Frühjahr vor Einsetzen

der Belaubung im Vergleich zur Befliegung mit der Ricoh/Zeiss-Kamera bei voller Belaubung im Hochsommer deutlich besser ist. Der Einfluss der Vegetation ist auch aus Standard-Photogrammetrieanwendungen bekannt. Die SIFT-Punktzuordnung ist weniger anfällig gegenüber Störungen durch Vegetation, was sich an der in beiden Fällen deutlich größeren Anzahl von Verknüpfungspunkten zeigt. Für die Ricoh/Zeiss-AT wurden die SfM-Punkte auf 27.367 Punkte ausgedünnt. Ursprünglich wurden 103.787 Punkte durch das SfM-Verfahren erzeugt, wobei die eigentliche SIFT-Punktzuordnung gar nicht bis zu untersten Pyramidenstufe (maximale Auflösung) fortgesetzt wurde, da sonst für den Ricoh/Zeiss-Flug deutlich über 300.000 Punkte generiert worden wären. Dies zeigt die bessere radiometrische Qualität der Ricoh/Zeiss-Bilder.

Für beide Bildverbände wurde auch die Rolle von Zusatzparametern in der AT untersucht. Zur Anwendung kamen die Polynommodelle von Ebner (12 Parameter (SC 12)) und Grün (44 Parameter (SC 44)), die in Match-AT implementiert sind. Für die Ricoh/Zeiss-Konfiguration zeigen sich im Objektraum kaum Veränderungen. Die Absolutdifferenzen an den Kontrollpunkten scheinen eher etwas größer zu werden. Für die Canon ist eine leicht-

te Verbesserung der RMS-Werte, vor allem in der Vertikalen zu erkennen. Insgesamt ist nur ein geringer Einfluss der Zusatzparameter sichtbar, was auf die gute Vorabkorrektur der Bilder und eine ausreichende geometrische Stabilität der Kamera hinweist.

Abschließend wurde für die Ricoh/Zeiss-Befliegung eine GPS-gestützte AT bei signifikant reduzierter Passpunktanzahl durchgeführt. Aufgrund von streifenabhängigen Systematiken zwischen GPS und Photogrammetrie wurden je Flugstreifen Offset und Driftkorrekturen für die GPS-Projektionszentren angesetzt. Die für die GPS-Positionen in der AT geschätzten RMS-Werte nach Offset/Driftkorrektur betragen je ca. 0,45 m für Ost-, Nord- und Vertikalkoordinate. Details zur eingesetzten GPS-Hardware und Trajektorienberechnung finden sich in CRAMER et al. (2013a). Die erzielten Objektraumgenauigkeiten sind im Vergleich zur rein passpunktbasierten Auswertung mit vielen Passpunkten etwa um den Faktor 1,5 schlechter. Eine GPS-gestützte AT mit nur 4 Passpunkten in den Blockecken ist zwar möglich. Bei der hier vorliegenden Qualität der GPS-Trajektorienbestimmung müssen aber Einbußen in der Genauigkeit hingenommen werden.

Tab. 1: Ergebnisse der Aerotriangulation mit Match-AT.

	PP/KP	σ_0 (pix)	Std.Abw. (m)			RMS (m) (aus KP)		
			Ost	Nord	Vertikal	Ost	Nord	Vertikal
<i>Canon, 202 Bilder</i> SfM-Pkte (Anzahl: 165.970)	22/11	0,7	0,036	0,032	0,141	0,050	0,037	0,095
AAT-Pkte (Anzahl: 8.011)	22/11	0,3	0,008	0,007	0,024	0,030	0,023	0,050
AAT-Pkte, SC 12	22/11	0,3	0,007	0,007	0,022	0,024	0,021	0,044
AAT-Pkte, SC 44	22/11	0,3	0,007	0,007	0,022	0,022	0,021	0,037
<i>Ricoh/Zeiss, 190 Bilder</i> SfM-Pkte (Anzahl: 27.367)	22/11	0,7	0,034	0,030	0,110	0,031	0,037	0,058
AAT-Pkte (Anzahl: 1.439)	22/11	0,3	0,018	0,015	0,049	0,029	0,024	0,043
AAT-Pkte, SC 12	22/11	0,3	0,018	0,015	0,048	0,028	0,028	0,051
AAT-Pkte, SC 44	22/11	0,3	0,017	0,015	0,048	0,027	0,029	0,051
AAT-Pkte, GPS, Off/Drift	4/29	0,3	0,024	0,021	0,062	0,040	0,074	0,083

4.4 Generierung dichter Oberflächenmodelle

Für die Erzeugung dichter 3D-Punktwolken und Oberflächenmodelle wurde ein Ansatz basierend auf dem Semi-Global Matching Verfahren von HIRSCHMÜLLER (2008) genutzt. Dieses Verfahren führt eine Stereozuordnung für jedes einzelne Pixel durch und erzeugt somit sehr dichte 3D-Punktwolken. Darüber hinaus ermöglichen die sich stark überlappenden Bildverbände eine kombinierte pixelweise Zuordnung mehrerer sich überdeckender Stereobildpaare. Somit stehen pro Pixel mehrere redundante Stereomessungen zur Verfügung, was eine erhebliche Steigerung von Genauigkeit, Vollständigkeit und Zuverlässigkeit der daraus abgeleiteten 3D-Punktwolke ermöglicht (HAALA 2011). Aus Bildern großformatiger digitaler Luftbildkamerasysteme können so 3D-Punktwolken mit einer Genauigkeit im Subpixelbereich gewonnen werden (HAALA & ROTHERMEL 2012a/b). Analog zu diesen Untersuchungen wurde zur Auswertung der UAV-Aufnahmen das am Institut für Photogrammetrie entwickelte System SURE (ROTHERMEL et al. 2012) eingesetzt. Dabei konnten aufgrund der ähnlichen Blockkonfiguration für die Aufnahmen mit der Canon IXUS 100 und der Ricoh/Zeiss beide Datensätze mit identischer Parametrisierung für die Auswahl der Stereopaare, die dichte Zuordnung und die Triangulation prozessiert werden. Mittlerweile existieren verschiedene Implementierungen zur bildbasierten Erzeugung dichter 3D-Punktwolken, die aktuell in einem Vergleichstest auf ihr Genauigkeitspotenzial hin untersucht werden. Dieser Test wurde von der EuroSDR (European Spatial Data Research) initiiert. Eine abschließende Publikation über diesen Test steht noch aus. Der aktuelle Status kann unter EUROSDR (2013) eingesehen werden.

Üblicherweise ermöglichen Befliegungen mit großformatigen Luftbildkamerasystemen vor allem in Kombination mit einer stabilisierten Plattform eine gute Übereinstimmung zwischen geplanter und tatsächlich erfasster Bildüberdeckung. Im Gegensatz dazu verursacht die relativ große Bewegungsdynamik einer UAV-Plattform häufig eine vergleichs-

weise heterogene Überdeckung der erfassten Bilder. Um dennoch eine automatisierte Auswahl optimaler Bildpaare für die dichte Zuordnung zu ermöglichen, wurde ein Initialisierungsschritt realisiert. Hierfür wurden zunächst alle Bilder des Blocks auf 1/256 der ursprünglichen Auflösung reduziert. Aus Bildpaaren, deren Projektionszentren nicht weiter als 150 m voneinander entfernt lagen, wurden dann Stereomodelle gebildet, um 3D-Punkte zu bestimmen. Die aus allen Stereomodellen kombinierte und auf einen Punktabstand von 3 m ausgedünnte Punktwolke diente der Analyse der Schnittgeometrie der unterschiedlichen Bilder und der anschließenden automatischen Festlegung der nach Überlappung und Schnittwinkel optimalen Stereobildpaare. Mit diesen Stereomodellen wurde schließlich die Bestimmung der 3D-Punkte in der höchsten Auflösung wiederholt.

Für die Ricoh/Zeiss-Befliegung ergaben sich aus dieser Initialisierung für jedes der 190 Bilder bis zu 24 Stereomodelle. Insgesamt wurden so 2003 Bildpaare generiert und zur Oberflächenrekonstruktion genutzt. Analog dazu ergaben sich für den Canon-Bildverband mit 207 Bildern insgesamt 2170 Stereopaare. Da aufgrund der großen Überdeckung für jedes Pixel eines Basisbildes mehrere mögliche Stereopartner zur Verfügung standen, war eine hoch redundante Bestimmung des zugehörigen 3D-Punktes möglich. Dabei wurden fehlerhafte Parallaxenschätzungen eliminiert und das Rauschen der erzeugten 3D-Punktwolke vermindert. Letztlich wurde ein 3D-Objektpunkt nur dann generiert, wenn er aus mindestens zwei Stereomodellen konsistent bestimmt werden konnte.

Aus diesen sehr dichten 3D-Punktwolken wurden dann Digitale Oberflächenmodelle (DOM) abgeleitet, wobei als Gitterweite des resultierenden Rasters die mittlere GSD der Flüge von 6 cm gewählt wurde. In der Regel standen pro Rasterzelle mehrere 3D-Punkte aus der dichten Stereozuordnung zur Verfügung. Um eine ausreichende Zuverlässigkeit des Gitters zu gewährleisten, wurde Zellen mit weniger als drei Punkten kein Höhenwert zugewiesen. Für alle anderen Zellen wurde aus den darin liegenden 3D-Punkten sowohl die Höhe als auch der Farbwert durch Bildung des Medians bestimmt. Die Abb. 5 zeigt ex-

emplarisch das aus der Ricoh/Zeiss-Befliegung generierte Oberflächenmodell für das Testgebiet. In den sehr steilen und sichteingeschränkten Bereichen, z. B. Felsen und Weinbergmauern, können aufgrund der senkrechten Blickrichtung keine Höhenwerte berechnet werden.

Zur Bestimmung des Rauschens der rekonstruierten Oberfläche wurden ebene Regionen genutzt. Geeignete 3D-Referenzobjekte, die eine absolute Kontrolle der Vertikalgenauig-

keit erlauben, standen im Befliegungsgebiet nicht zur Verfügung. Das Standard-DGM der Landesvermessung ist zu gering aufgelöst und kann mit seiner angegebenen Genauigkeit von besser als 0,5 m nicht als Referenz dienen. Für die Bestimmung des Punktrauschens wurden daher die in Abb. 6 dargestellten 30 Gebiete auf zwei Straßen manuell definiert. Aus den darin befindlichen Rasterpunkten wurde je eine Ebene durch Kleinste-Quadrate-Schätzung bestimmt, wobei der orthogonale



Abb. 5: Oberflächenmodell des Testgebiets aus Ricoh/Zeiss Befliegung.



	Straße oben	Straße unten
Canon	30 mm	42 mm
Ricoh	20 mm	22 mm
Canon 3σ	29 mm	40 mm
Ricoh 3σ	19 mm	21 mm

(Relative) Vertikalgenauigkeit
DOM (Std.Abw.)

Abb. 6: Ebene Testbereiche zur Bestimmung des Punktrauschens und ermittelte Genauigkeiten (Standardabweichung).

Punkt-zu-Ebenen-Abstand minimiert wurde. Eine mögliche Wölbung der Straßenoberfläche quer zur Fahrtrichtung (Fahrbahnprofil) wird hierbei vernachlässigt. Aufgrund des variierenden Bildmaßstabs wurden Gebiete von unterer und oberer Straße getrennt untersucht. Für den Canon-Flug ergab sich für die obere Straße mit einer GSD von 6 cm eine Standardabweichung von 30 mm. Für die untere Straße mit einer GSD von 8 cm betrug die Standardabweichung 42 mm. Für den Ricoh/Zeiss-Datensatz ergaben sich für die obere Straße 20 mm und die untere Straße 22 mm. Zur Eliminierung potenzieller Ausreißer wurden alle Punkte mit Abständen $> 3\sigma$ eliminiert und Standardabweichungen aus den verbleibenden Punkten erneut berechnet. Dabei ergaben sich für den Canon-Flug 29 mm und 40 mm für die obere und untere Straße, bei der Ricoh/Zeiss-Befliegung lagen die Werte bei 19 mm und 21 mm.

Generell führte die Stereozuordnung mittels SGM in Bereichen mit geringer Textur, wie sie in den 30 Testregionen vorlag, eher zu einer Glättung der rekonstruierten Oberfläche, so dass die Werte mit stark variierenden Höhen ein etwas stärkeres Messrauschen aufweisen dürften. Dennoch ist die Standardabweichung (Rauschen) für den Ricoh/Zeiss-Flug im Bereich von $\frac{1}{2}$ GSD durchaus beeindruckend.

5 Aufstiegsgenehmigung

Die in den vorangegangenen Kapiteln dargestellten Ergebnisse der Untersuchungen zur UAV-gestützten Geodatenerfassung in der Landesvermessung haben deutlich gezeigt, dass aus technologischer Sicht UAVs erstmals eine Möglichkeit zur kleinräumigen, aktuellen und flexiblen Aufnahme von entsprechenden Projektgebieten liefern. Derartige Aufnahmeverfahren standen bislang noch nicht zur Verfügung, vor allem wenn man den vergleichsweise niedrigen Kostenrahmen betrachtet.

Ein limitierender Faktor ist allerdings das Verfahren zur Erlangung von Aufstiegsgenehmigungen für UAVs, zumindest zum Zeitpunkt der in 2012 durchgeführten Flugbeantragung. Für die Durchführung der Befliegung

Hessigheim wurde das komplette Verfahren zur Erlangung einer Einzelaufstiegserlaubnis beim Regierungspräsidium Stuttgart durchlaufen. Die Erteilung der Aufstiegserlaubnis hat sich letztlich über einen Zeitraum von ca. 2 Monaten hingezogen. Genehmigt wurde dann ein nur 2 x 15-minütiges Flugfenster, zuzüglich Funktionstest. Die zum Teil sehr restriktiven Auflagen waren de facto vor Ort kaum erfüllbar, obwohl die Hauptzufahrtswege in das Projektgebiet durch Aufsichtspersonal für den Flugzeitraum bestmöglich abgesperrt wurden.

Da die Aufstiegsenehmigung als Einzelfallentscheidung ausgesprochen wurde, muss ein derartiges Genehmigungsverfahren für eine ähnliche Befliegung in einem anderen Gebiet nochmals durchlaufen werden. Dieses schränkt den flexiblen Einsatz von UAV momentan noch stark ein.

Allerdings sind auf verschiedenen nationalen und internationalen Ebenen intensive Bestrebungen im Gange, UAVs als Flugzeuge in den Luftraum zu integrieren und die Verfahren zur Aufstiegsenehmigung zu harmonisieren und zu vereinfachen. Praktisch zeitgleich zu dem hier durchgeführten Antragsverfahren hat das Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung im Juni 2012 gemeinsame Grundsätze des Bundes und der Länder für die Erteilung der Erlaubnis zum Aufstieg von unbemannten Luftfahrtsystemen veröffentlicht (BMVBS 2012). Anhand dieser Grundsätze wird nun auch in Baden-Württemberg über die Aufstiegserlaubnis entschieden. Die Anwendbarkeit der Richtlinie beschränkt sich auf folgende Kriterien:

- Sichtkontakt zum Steuerer,
- keine ausschließliche Nutzung für Sport oder Freizeitgestaltung,
- maximale Flughöhe von 100 m über Grund,
- Gesamtmasse maximal 25 kg.

Im Rahmen dieser Grundsätze können die Länder nun eine Allgemeinerlaubnis zum Aufstieg von unbemannten Luftfahrtsystemen bis zu 5 kg Gesamtmasse erteilen. Diese allgemeine Fluggenehmigung soll laut Empfehlung für zwei Jahre und länderübergreifend gelten. In der derzeitigen Verwaltungspraxis ist die Erlaubnis jedoch in einem Bundesland zu beantragen und wird dann in den meisten anderen, aber nicht allen, anerkannt. Die Dauer der

Gültigkeit variiert je nach Bundesland zwischen einem und drei Jahren. Ähnliche Unterschiede gelten für die Bearbeitungsgebühren. Abweichungen von den Kriterien der Allgemeinerlaubnis, z. B. bei Flug über Ortschaften oder in größeren Flughöhen, machen weiterhin Einzelbeantragungen notwendig. Die allgemeine Aufstiegserlaubnis soll zukünftig auf Fluggeräte bis 25 kg erweitert werden.

Parallel hat die UAV-Dach (Deutschsprachige Arbeitsgruppe für Unbemannte Luftfahrzeuge (UAV), (UAV-DACH 2013) und der BDLI (Bundesverband deutscher Luft- und Raumfahrtindustrie, BDLI 2013) ein Konzept zum sicheren Betrieb von unbemannten Luftfahrtsystemen (UAS) unter 150 kg erarbeitet. Dieses Dokument ist dem BMVBS Anfang 2013 zugesandt worden. Es dreht sich hierbei um die weitere Klassifikation der UAVs und die Zuweisung von klassenindividuellen Gefährdungspotenzialen. Aufgrund derartiger Dokumente und Initiativen wird in wenigen Jahren ein einheitliches Verfahren für die UAV-Aufstiegsgenehmigungen erwartet.

Auch auf europäischer Ebene finden entsprechende Harmonisierungen statt. Hier sind die Initiativen im Rahmen der EU, z. B. Commission Staff Working Document „Towards a European strategy for the development of civil applications of Remotely Piloted Aircraft Systems (RPAS)“ (EU 2013) oder die Arbeiten im Rahmen von JARUS (JARUS 2013), zu nennen. Bereits im Sommer 2013 soll die EU-Roadmap zur Integration von UAV in den Luftraum vorgelegt werden. Ab 2016 soll laut EU die europaweite Integration von UAV in den Luftraum erfolgen. Damit werden UAV-Anwendungen mittelfristig auch aus genehmigungstechnischer Sicht einfacher und grenzüberschreitend durchführbar sein.

6 Zusammenfassung

Im Rahmen des Pilotprojekts UAV@LGL wurde erstmals im Rahmen deutscher Vermessungsverwaltungen die Verwendung von UAVs für Anwendungen der Landesvermessung untersucht.

Die Bilder wurden mit zwei unterschiedlichen Kamerasystemen über dem Projektgebiet erfasst und ausgewertet. Die Bildorientierung

wurde mit Standard-AT-Programmen durchgeführt. Lediglich die vor-Ort-Kamerakalibrierung und Vororientierung bedingen einen gewissen Mehraufwand. Für diese sind zusätzliche Software bzw. andere Ansätze notwendig (SfM-Verfahren). Es ist jedoch davon auszugehen, dass klassische AT-Programme in naher Zukunft zumindest um diese SfM-Verfahren ergänzt werden. Die dichte Punktwolkengenerierung wurde ebenfalls sehr zeitnah in photogrammetrische Arbeitsabläufe integriert. Es wurde der Nachweis erbracht, dass auch mit relativ einfachen Kamera- und Trägersystemen 3D-Objektpunktbestimmungen im Sub-Pixelbereich (absolute Genauigkeit) möglich sind.

Die 3D-Oberflächenmodelle wurden mit Verfahren des Dense-Matching flächendeckend mit höchster Auflösung generiert. Für jedes Pixel liegt ein Höhenwert vor. Damit kann das Oberflächenmodell mit einer Rasterweite von einem Pixel (6 cm) generiert werden. Für die Oberflächenmodellgenerierung konnten relative Höhengenaugigkeiten (Rauschen) im Bereich von $\frac{1}{2}$ Pixel (Standardabweichung) nachgewiesen werden.

Eine explizite Modellierung von touristischen oder topographischen 3D-Landmarken, hier z. B. Kletterfelsen, wurde nicht durchgeführt, da die Bildaufnahme aus Starrflüglern vor allem für steile Regionen durch Schrägbilder ergänzt werden sollte. Prinzipiell ist festzuhalten, dass für eine derartige Anwendung Rotorflügler zu bevorzugen sind, da man mit diesen flexiblere Flugpfade kreisförmig um das aufzunehmende Objekt mit quasi beliebig dichter Bildüberdeckung realisieren kann.

Aufgrund der Resultate der Studie kann die UAV-gestützte Datenerfassung in operationellen Anwendungen der Landesvermessung als erfolgreich betrachtet werden. Die geforderten Produkte wurden abgeleitet, die Genauigkeiten konnten übererfüllt werden. Die flexible Verwendung derartiger Plattformen wurde jedoch durch das zum Zeitpunkt der Flugbeantragung geltende Genehmigungsverfahren zur Erlangung einer Aufstiegserlaubnis limitiert. Es ist aber davon auszugehen, dass sich in den nächsten Jahren weitere Änderungen bei den Verfahren zur Erlangung von Aufstiegsgenehmigungen ergeben.

Danksagung

Unser besonderer Dank gilt dem LGL Baden-Württemberg für die Finanzierung dieser Studie. Viele LGL-Mitarbeiter haben uns in der praktischen Durchführung der Studie jederzeit bestmöglich unterstützt. Dank gilt auch den Kollegen vom iFR der Universität Stuttgart, ohne die diese UAV-Befliegungen nicht durchführbar gewesen wären.

Literatur

- ABDEL-WAHAB, M., WENZEL, K. & FRITSCH, D., 2011: Reconstruction of Orientation and Geometry from large Unordered Datasets for Low Cost Applications. – LC3D Workshop, Berlin.
- ABDEL-WAHAB, M., WENZEL, K. & FRITSCH, D., 2012: Efficient Reconstruction of Large Unordered Image Datasets for High Accuracy Photogrammetric Applications. – ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences **I** (3): 1–6, Melbourne, Australia.
- BDLI, 2013: <http://www.bdli.de/> (18.6.2013).
- BLYENBURGH, P., 2012: RPAS Yearbook 2012/13 – The global perspective, http://www.uvs-info.com/index.php?option=com_content&view=article&id=244&Itemid=280 (18.6.2013).
- BMVBS, 2012: http://www.luftverkehr.de/index.php?option=com_content&view=article&catid=63:brd-bekanntmachungen-nfl-1&id=2109:c2012-1-161 (18.6.2013).
- BORMATEC, 2013: http://bormatec.com/index.php?option=com_content&view=article&id=78&Itemid=59&lang=en (18.6.2013).
- CRAMER, M. & HAALA, N., 2012: Genauigkeitspotential der photogrammetrischen Bildauswertung für Daten unbemannter Luftfahrzeuge. – 32. DGPF-Jahrestagung: 428–440, Potsdam.
- CRAMER, M., HAALA, N., ROTHERMEL, M., LEINSS, B. & FRITSCH, D., 2013a: UAV-gestützte Datenerfassung für Anwendungen der Landesvermessung – das Hessigheim-Projekt. – 33. DGPF-Jahrestagung, 3-Ländertagung: 450–469, Freiburg.
- CRAMER, M., BOVET, S., GÜTLINGER, M., HONKAVAARA, E., MCGILL, A., RIJSDIJK, M., TABOR, M. & TOURNADRE, V., 2013b: On the use of RPAS in national mapping – the EuroSDR point of view. – UAV-g 2013: Rostock, Beitrag eingereicht.
- EU, 2013: <http://register.consilium.europa.eu/pdf/en/12/st13/st13438.en12.pdf> (18.6.2013).
- EUROSDR, 2013: <http://www.ifp.uni-stuttgart.de/euroedr/ImageMatching/index.en.htm7> (18.6.2013).
- FARENZENA, M., FUSIELLO, A. & GHERARDI, R., 2009: Structure and motion pipeline on a hierarchical cluster tree. – ICCV Workshop on 3-D Digital Imaging and Modeling: 1489–1496.
- HAALA, N., 2011: Multiray Photogrammetry and Dense Image Matching. – FRITSCH, D. (ed.): Photogrammetric Week '11: 185–195, Wichmann.
- HAALA, N. & ROTHERMEL, M., 2012a: Dense Multiple Stereo Matching of Highly Overlapping UAV Imagery. – The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences **XXXIX** (B1): 387–392, Melbourne, Australia.
- HAALA, N. & ROTHERMEL, M., 2012b: Dense Multi-Stereo Matching for High Quality Digital Elevation Models. – PFG – Photogrammetrie, Fernerkundung, Geoinformation **2012** (4): 331–343.
- HIRSCHMÜLLER, H., 2008: Stereo Processing by Semi-Global Matching and Mutual Information. – IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence **30** (2): 328–341.
- ICAO, 2011: ICAO Cir 328, Unmanned Aircraft Systems (UAS), Order Number: CIR328, http://www.icao.int/Meetings/UAS/Documents/Circular%20328_en.pdf (18.6.2013).
- JARUS, 2012: <http://www.jarus-rpas.org/> (18.6.2013).
- MANYOKY, M., THEILER, P., STEUDLER, D. & EISENBEISS, H., 2012: Anwendung von UAVs in der Katastervermessung. – AVN (Allgemeine Vermessungsnachrichten) **2012** (1): 24–28.
- KÜNG, O., STRECHA, C., BEYELER, A., ZUFFEREY, J.-C., FLOREANO, D., FUA, P. & GERVAIX, F., 2011: The accuracy of automatic photogrammetric techniques on ultra-light UAV imagery. – IAPRS **XXXVIII-1/C22**, UAV-g 2011: 1–6, Zurich, Switzerland.
- REMONDINO, F., 2006: Detectors and descriptors for photogrammetric applications. – IAPRS **XXXVI** (3): 1–6, Bonn.
- ROTHERMEL, M., WENZEL, K., FRITSCH, D. & HAALA, N., 2012: SURE: Photogrammetric Surface Reconstruction from Imagery. – LC3D Workshop 2012, Berlin.
- SNAVELY, N., SEITZ, S. & SZELISKI, R., 2008: Modeling the World from Internet Photo Collections. – International Journal of Computer Vision **80** (2): 189–210.
- UAV-DACH, 2013: <http://www.uavdach.org/> (18.6.2013).
- VAN HINGSBERG, W., RIJSDIJK, M. & WITTEVEEN, W., 2013: UAS for cadastral applications. – GIM International **27** (3): 20–25, http://www.gim-international.com/issues/articles/id1968-UASs_for_Cadastral_Applications.html (18.6.2013).

Adressen der Autoren:

Dr.-Ing. MICHAEL CRAMER, Prof. Dr.-Ing. NORBERT HAALA, Dipl.-Ing. MATHIAS ROTHERMEL, Prof. Dr.-Ing. DIETER FRITSCH, Universität Stuttgart, Institut für Photogrammetrie (ifp), D-70174 Stuttgart, Tel.: +49-711-685-84118, -83383, -84094, -83386, e-mail: {michael.cramer}{norbert.haala}{mathias.rothermel}{dieter.fritsch}@ifp.uni-stuttgart.de

cand. geod. BENEDIKT LEINSS, Ödweilerhofstraße 8, D-73104 Börlingen, e-mail: ben.leinss@web.de

Manuskript eingereicht: April 2013
Angenommen: Juni 2013